

Mitja Rinne

Pintamateriaalin vaikutus Leica P40- ja Leica MS50 -keilainten tarkkuuteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Maanmittaustekniikka
Insinöörityö
26.9.2017

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Mitja Rinne Pintamateriaalin vaikutus Leica P40- ja Leica MS50 -keilainten tarkkuuteen 40 sivua + 1 liite 26.9.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	lehtori Ilkka Partonen toimitusjohtaja Pekka Kiljunen
<p>Tämän insinöörityön tarkoituksena on tutkia, millaisia pintamateriaaleja Leica P40- ja MS50-keilaimilla voidaan mitata. Tiedyt materiaalit, kuten voimakkaasti heijastavat ja läpinäkyvät pinnat, vaikuttavat lasersäteeseen siten, että etäisyydenmääritys luotettavasti on hyvin haastavaa. Työn tilaaja oli Mittasuora Oy, joka on tehnyt investointeja laserkeilauskalustoon.</p> <p>Työssä käydään läpi laserin koostumus ja laserkeilainten toimintaperiaatteet. Lisäksi käydään läpi laserkeilauksen tarkkuuden määrittämisessä ja virheiden analysoinnissa käytettäviä tilastomatematiikan käsitteitä sekä kerrotaan, mitä eri virheitä mittauksissa syntyy. Käytetyistä laitteista ja ohjelmista kerrotaan teknisiä tietoja. Tekniset tiedot annetaan Leica P40:stä, Leica MS50:stä, Leica Cyclonestä ja CloudComparesta. Työssä selvitetään myös pistepilvellen asetetut laatuvaatimukset.</p> <p>Mittauskokeita tehtiin teollisuusalueella ja toimistotalojen pihassa. Kohteiksi valittiin rakennusten julkisivuja, koska ne ovat tyypillinen kohde, jota mallinnetaan laserkeilaamalla. Pyrin valitsemaan kohteita, joissa oli mahdollisimman paljon erilaisia pintamateriaaleja. Kohteita ei mitattu tunnettu koordinaatistoon. Eri kohdista otettiin pieniä näytteitä pistepilvistä ja niiden hajontaa tutkittiin vertaamalla niitä luotettavaan referenssipintaan CloudComparen Iterative Closest Point- ja Cloud-to-Cloud distances -algoritmeja käyttämällä.</p> <p>Tämän työn lukemalla saa kuvan mitkä kaikki tekijät vaikuttavat ilmassa kulkevaan ja pinnasta heijastuvaan lasersäteeseen ja mitatun pisteen tarkkuuteen, ja millä tavalla pistepilvien laatua voi tutkia CloudCompare-ohjelmalla.</p>	
Avainsanat	laserkeilaus, laser, pistepilvi, mallintaminen

Author Title Number of Pages Date	Mitja Rinne The effect of surface materials on the accuracy of Leica P40 and Leica MS50 laser scanners 40 pages + 1 appendix 26 September 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Ilkka Partonen, Senior Lecturer Pekka Kiljunen, General Manager
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to study what kind of surface materials can be measured with Leica P40 and MS50 laser scanners. It has been noticed, that glowing and transparent surfaces cause effects to the reflection of the laser beam, that make range measurements unreliable.</p> <p>To establish this, the consistency of a laser beam and the operations of laser scanners were looked into. The accuracy determination of scanned point clouds, various measurement errors and quantities in statistics used in error analysis were also studied. Technical information about Leica P40 and Leica MS50 laser scanners, as well as Leica Cyclone and CloudCompare software was collected. Quality requirements for point clouds were reviewed.</p> <p>As test measurements, the facades of an industrial zone and some office blocks were measured because they are typical objects for laser scanning and 3D-modelling. These targets were chosen because of their many different surface materials. Measurements were not made in any known coordinate system.</p> <p>Small samples were taken from the measured point clouds. The samples were compared to a dense and flat reference cloud and then analyzed by using the algorithms Iterative Closest Point and Cloud-to-Cloud distances of CloudCompare software.</p> <p>The thesis established the factors that affect a laser beam in the air and, when it reflects from a surface, how the factors cause various errors to measurements and how CloudCompare software can be used to analyze the quality of the measured point clouds.</p>	
Keywords	laser scanning, laser, point cloud, modelling

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Laserkeilaus	2
2.1	Laserin koostumus	2
2.2	Laserkeilain	2
2.3	Menetelmät etäisyyden määrittämiseen	4
2.3.1	Signaalin kulku aikaan perustuva mittaaminen	4
2.3.2	Vaihe-eromittaus	6
2.3.3	Aaltomuodon digitointi	8
2.3.4	Kolmiointimittaus	9
3	Laserkeilauksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä	10
3.1	Etäisyydstarkeus	10
3.1.1	Normaalijakauma	11
3.1.2	Keskihajonta ja rms-luku	11
3.1.3	Virheiden lineaarisuus	13
3.2	Kulmatarkkuus	13
3.3	Laserpulssin ominaisuudet	14
3.4	Ulkoiset tekijät	16
3.4.1	Pinnan heijastavuus	16
3.4.2	Ilman olosuhteet	17
3.4.3	Interferenssi	18
3.4.4	Tähtysvakio	18
3.5	Laitteen sisäiset tekijät	18
4	Tutkimuksessa käytettävät laitteet ja ohjelmat	19
4.1	Leica P40 -laserkeilain	19
4.2	Leica MS50 -keilaintakymetri	22
4.3	Leica Cyclone	25
4.4	CloudCompare	26
5	Tutkimukset	27
5.1	Pistepilven vaatimukset	27
5.2	Mittauskokeet	27

5.2.1	Teollisuusrakennukset	28
5.2.2	Toimistotalot ja muuri	30
5.2.3	Julkisivun termoseinät	31
5.3	Analyysi	31
5.3.1	Näytteiden otto pistepilvistä	31
5.3.2	Näytteiden vertaaminen referenssipintaan	32
5.3.3	Tulosten analysointi	35
6	Johtopäätökset	36
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. Tutkimuksen tulokset ja laskelmat. Liite vain työn tilaajan käyttöön.	

Lyhenteet ja käsitteet

albedo	Pinnan heijastuskerroin, joko luku väliltä 0–1 tai prosenttiluku. Kertoo, kuinka suuri osa pintaan osuneesta valosta heijastuu takaisin
divergenssi	Laserkeilan leviäminen, joka kasvattaa keilan leveyttä ja alentaa sen energiaa
interferenssi	Aaltojen yhteisvaikutus
iterointi	Matemaattinen menetelmä, jossa pyritään haluttuun lopputulokseen samoja työvaiheita toistamalla
keskihajonta	Mittausten keskiarvosta poikkeamien neliöllinen keskiarvo
kohina	Sama kuin keskihajonta
laser	Koherentista valosta muodostuvia valoaaltoja, jotka toimivat toisiaan vahvistaen
mesh	Pinnasta tehty kolmioverkkomalli
referenssi	Vertailuarvo, kohde johon verrataan
reflektanssi	Pinnan heijastussuhde, sama kuin albedo
resoluutio	Pistetiheys, näytteenottoväli
rms	Root mean square, mittausten todellisesta arvosta poikkeamien neliöllinen keskiarvo
SNR	Signal-to-noise-ratio, signaali- ja kohinatehon suhde jota käytetään monien laserkeilauksen tarkkuutta ja luotettavuutta kuvaavien suureiden laskennassa

säteen intensiteetti

Luku väliltä 0–1 tai prosenttiluku, joka kertoo, kuinka suuri osa lasersäteen energiasta palaa takaisin laitteelle

YTV2012 Yleiset Tietomallivaatimukset 2012, Senaatti-kiinteistöjen laatima ohje tietomallinnuksesta, jossa käydään läpi lähtötilanteen mallintamiseen käytetyn pistepilven laatuvaatimukset

1 Johdanto

Laserkeilaus on voimakkaasti kehittyvä ja yleistynyt nykyaikainen mittausmenetelmä, jota voidaan hyödyntää muun muassa maastomallinnuksessa, rakennusten 3D-mallinnuksessa ja kartoitus- ja tarkemittauksissa. Useimmissa kohteissa laserkeilaimilla päästään mittauksille asetettuihin laatuvaatimuksiin, mutta jotkut kohteet tiedetään ongelmallisiksi.

Työn tilaaja Mittasuora Oy halusi selvittää, mitä kohteita yrityksen omistamilla Leica P40- ja Leica Nova MS50 -keilaimilla voidaan mitata. Yritykselle on tärkeää tietää, minkä kohteiden laserkeilauksesta se voi tehdä tarjouksia.

Voidakseni selvittää, missä olosuhteissa Leica P40- ja Leica Nova MS50 -keilaimet täyttävät tai eivät täytä laatuvaatimuksia, minun täytyi ottaa selvää siitä, millaisia laatuvaatimuksia on laadittu. Selittääkseni havaittuja virheitä otin selvää, millaisia erilaisia menetelmiä laserkeilaimet käyttävät mitattujen pisteiden etäisyyden määrittämiseen ja mistä kaikesta syntyy virheitä mittauksiin. Työssä on myös selvitetty laserin koostumus ja laserkeilainten toiminta sekä laseriin vaikuttavia fysikaalisia ilmiöitä ilmakehässä ja mitattavassa pinnassa, koska ne auttavat hahmottamaan virheiden muodostumista ja laser säteen käyttäytymistä erilaisissa kohteissa. Ne ovat myös hyödyksi mitattua aineistoa tutkittaessa.

Tein käytännön kokeita, joissa mittasin laitteilla erilaisia pintoja. Valitsin kohteiksi erilaisia pintamateriaaleja sisältäviä rakennusten julkisivuja, koska julkisivu on tyypillinen kohde, jota laserkeilataan. Analysoin mittaustuloksia ohjelmalla, jolla voi verrata pistepilveä toiseen pistepilveen tai mesh-kolmioverkkoon. Selvitin eri kohteista mitattujen pistepilvien laatua ohjelman antamien tilastomatemaattisten suureiden avulla.

2 Laserkeilaus

2.1 Laserin koostumus

Laser tulee sanoista *light amplification by stimulated emission of radiation* eli 'valon vahvistaminen säteilyn stimuloidulla emissiolla'.

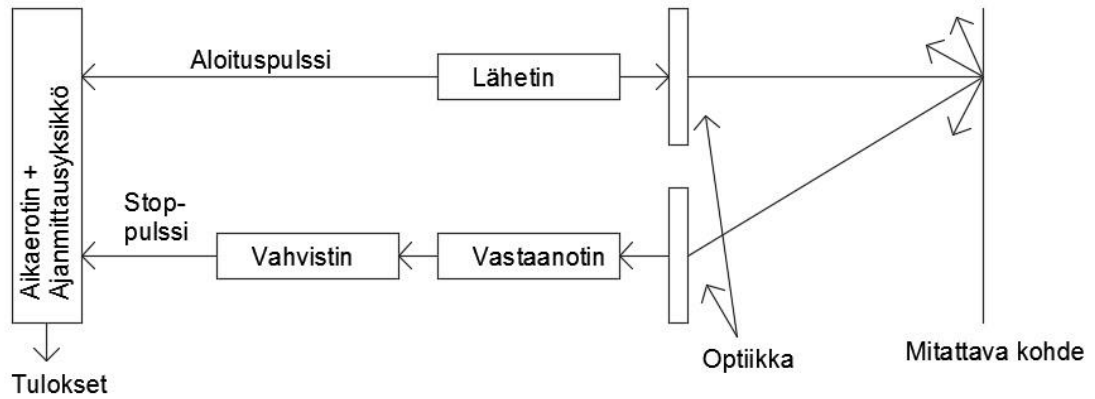
Laser syntyy siten, että laseraineen (kuten neodyymin tai kaasun) energiaa lisätään, jotta saadaan riittävän suuri määrä viritystilassa olevia atomeita. Stimuloitu emissio tarkoittaa sitä, että viritettyä atomia stimuloidaan kuljettamalla foton sen ohi, jolloin viritystila laukeaa ja atomi palaa perustilaan. Se lähettää eli emittoi samalla fotonin, jolla on sama vaihe, suunta, energia ja polarisaatio kuin emission aiheuttaneella fotonilla. Suuri määrä viritettyjä atomeja saa aikaan ketjureaktion, jolloin syntyy suuri määrä samaan suuntaan liikkuvia fotoneja.

Syntyvä valo on koherenttia valoa, eli aallot ovat samanvaiheisia, samanpituisia ja värähtelevät samalla taajuudella, jolloin ne toimivat toisiaan vahvistaen. (Peltonen yms. 2012: 379–383.) Laser on koherentimpaa, suurempaa, kirkkaampaa ja monokromaattisempaa eli yksivaiheisempaa kuin mikään muu valo (Vosselman & Maas 2010: 12).

2.2 Laserkeilain

Laserkeilain mittaa pysty- ja vaakakulmia sekä etäisyyksiä. Etäisyydenmittaus perustuu lasersäteen kulku-aikaan, eli se on verrattavissa prismattomaan takymetrimittaukseen. (Heiska 2010.) Laserkeilaus voidaan tehdä paikallaan olevalla laitteella, liikkuvasta ilmaluksesta tai ajoneuvosta (Rönnholm 2005).

Lähetin emittoi lasersäteen, josta osa ohjataan käynnistämään vastaanottimen ajanmittausyksikkö ja osa lähetetään kohteeseen. Mitattavaan pintaan osuessa osa siitä heijastuu takaisin laitteelle ja menee vastaanottimeen eli detektoriin. Sen jälkeen sitä vahvistetaan, ja se lähtee aikaerottimeen, joka pysäyttää ajanmittausyksikön (kuva 1). (Reshetyuk 2006: 23–24.)



Kuva 1. Laserkeilaimen toimintaperiaate (Reshetyuk 2006: 22).

Kun tunnetaan valon kulkunopeus, voidaan etäisyydet laskea valon kulkemasta ajasta kaavalla

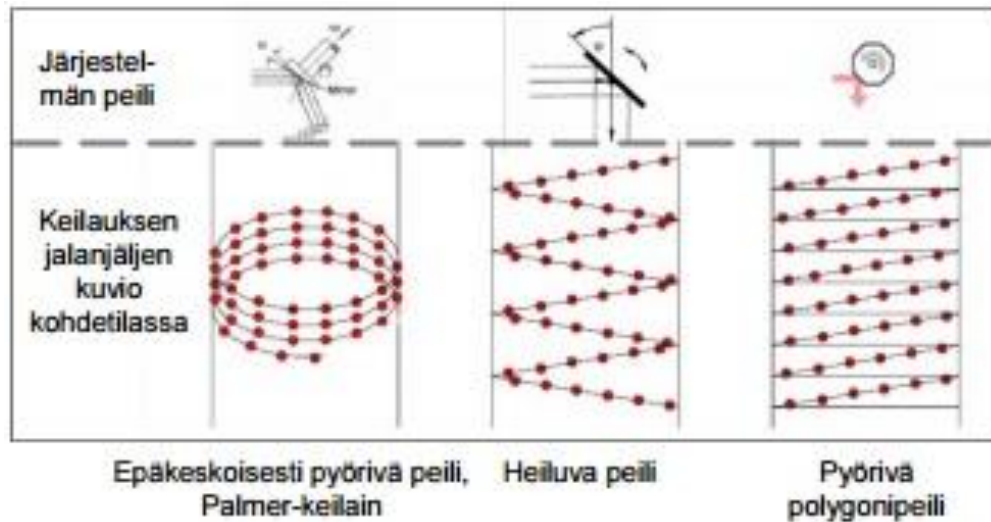
$$\rho = \frac{\tau c}{n} / 2 \quad (1)$$

, jossa ρ on etäisyys kohteeseen, τ on valon kulkema aika, c on valon nopeus tyhjiössä 299 792 458 m/s ja n on väliaineesta riippuva korjauskerroin (ilmassa $\approx 1,00025$) (Vosselman & Maas 2010:3). Kulmien ja etäisyyksien perusteella laite laskee mitatuille pisteille kolmiulotteiset x- y- ja z-koordinaatit koordinaatistossa, jonka origo on laserkeilaimessa. Jos syntyvän pistepilven koordinaatteja halutaan muuntaa toiseen koordinaatistoon, tarvitaan riittävästi tunnettuja pisteitä 3D- mallin ja halutun koordinaattijärjestelmän välillä. Laserkeilaimen etu, takymetriin verrattuna, on huomattavasti nopeampi mitaus, joka tuottaa miljoonia pisteitä minuutissa. Sillä voidaan myös mitata vaikeasti tavoitettavia ja vaarallisia paikkoja. (Koski 2001.)

Lasersäde suunnataan peilijärjestelmän avulla. Peilijärjestelmiä on heiluvia eli oskilloivia ja ympäripyöriä. Säteen ulostulokulmaa säädetään paitsi peilejä myös laitetta pyörittämällä. (Kukko 2005; Rönnholm 2005.)

Oskilloivalla peilillä saadaan kapea keilauskulma pienen kohteen tarkkaa mittaamista varten. Skannauskuvio on aallonmuotoinen ja pisteiden tiheys vaihtelee, koska peili muuttaa jatkuvasti heilumisnopeuttaan. Pyörivä polygonipeili on akselinsa ympäri pyörivä mekanismi, joka koostuu useasta peilipinnasta. Sillä saadaan mitattua yhdensuuntaisia pistelinjoja, mutta keilauskulma on yleensä alle 90°. Palmer-skanneri eli pyörivä

vinopeili on muussa kuin 90°:n kulmassa pyörimisakseliin nähden ja laser suunnataan peiliin pyörimisakselin suuntaisesti. Skannauskuvio on elliptinen ja keilauskulma periaatteessa jopa 360° (kuva 2). (Kukko 2005; Vosselman & Maas 2010: 16–18.)



Kuva 2. Erilaisia peilijärjestelmiä (Rönnholm 2005).

2.3 Menetelmät etäisyyden määrittämiseen

Etäisyyden määrittämiseen laserin avulla on eri menetelmiä. Menetelmillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa ja ne soveltuvat eri tilanteisiin.

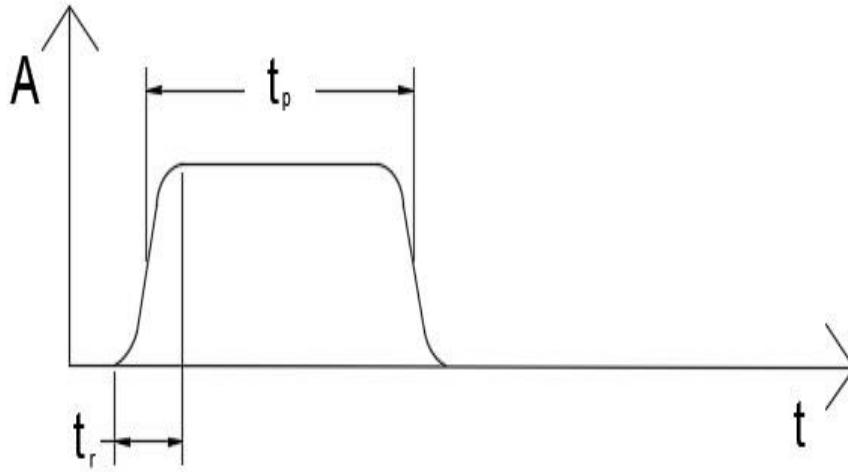
2.3.1 Signaalin kulkuaikaan perustuva mittaaminen

Signaalin kulkuajan mittaamisen periaate eli *time-of-flight*, *TOF*, *pulse round trip* tai aikaeromittaus perustuu laserpulssin kulkeman ajan mittaamiseen. Lähetetään lyhyitä laserpulssseja, joista mitataan signaalin kulkema matka jakamalla signaalin kulkuaika laserpulssin etenemisnopeudella.

Yhdestä pulssista on mahdollista mitata useampia kaikuja, joita voi muodostua mitattavan kohteen geometriasta. Kaikujen erottelu on mahdollista vain, jos niiden välinen etäisyys on yli puolet pulssin pituudesta. Pulssin pituus saadaan kaavalla

$$l_p = \frac{t_p}{n/c} \quad (2)$$

, jossa l_p on pulssin pituus ja t_p pulssin kesto. Jos pulssin kesto $t_p = 5$ ns ja pulssin nousuaika $t_r = 1$ ns (kuva 3), tällöin $l_p \approx 1,5$ m, eli kaikujen erottelu on mahdollista vain, jos niiden välinen etäisyys on suurempi kuin 0,75 m.



Kuva 3. Pulssin kesto ja pulssin nousuaika (Vosselman & Maas 2010).

Epävarmuus pulssin kulkemassa matkassa (*range uncertainty*), joka on osa kohinaa, saadaan kaavalla

$$\delta_{r-p} \approx \frac{c}{2} \frac{t_r}{\sqrt{SNR}} \quad (3)$$

, jossa SNR on signal-to-noise ratio ja t_r on pulssin nousuaika. Jos $SNR = 100$ ja $t_r = 1$ ns, epävarmuus on noin 15 mm. Joillakin laitteilla päästään 5–10 mm:n lukemiin.

Laserpulssin kaiun havaitessaan detektori laukaisee laukaisupulssin. Palaavan laserpulssin havaitsemiseen on eri tapoja. Havaitsin voi laukaista laukaisupulssin

- kaiun amplitudin ollessa maksimiarvossaan. Lentoaika on aikaväli lähetetyn pulssin maksimiampitudin ja vastaanotetun pulssin maksimiampitudin välillä. Huonona puolena ongelmat, jos kaiussa on useita aallonhuippuja.
- kaiun ylittäessä tietyn ennalta määrätyn kynnysarvon. Huonona puolena se, että lentoaika riippuu suuresti kaiun amplitudista.

- kaiun saavuttaessa tietyn murto-osan, esimerkiksi 50 %, maksimiampplitudista. Tämä menetelmä on melko riippumaton kaiun amplitudista, ja se on todettu hyväksi kompromissiksi kaiun havaitsemismenetelmää valittaessa.

(Vosselman & Maas, 2010: 3-5.)

Signaalin kulkuaikaan perustuvassa mittauksessa mittausetäisyys on jopa 2500 m, mutta pisteitä voidaan mitata yleensä alle 50 000 sekunnissa maalaserkeilaimilla. Joillakin ilmalaserkeilaimilla saadaan 200 000 pistettä sekunnissa. Mittaustarkkuus on joitakin millimetrejä, pidemmällä matkoilla senttimetrejä. (Vosselman & Maas 2010: 8; Rönnholm 2005: 9.)

2.3.2 Vaihe-eromittaus

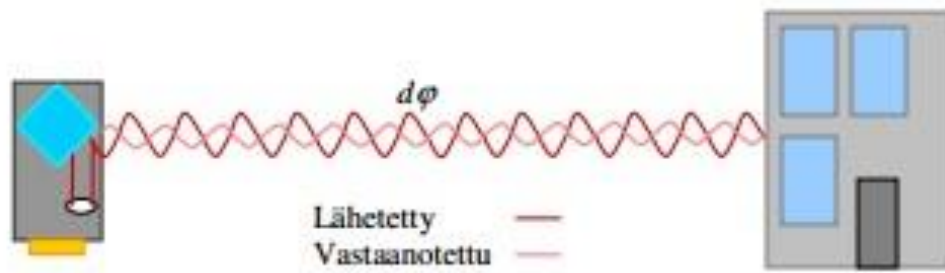
Vaihe-eromittaus (*continuous wave, CW, phase shift measurement*) perustuu jatkuvan lasersäteen aaltojen vaihe-eron mittaamiseen, jolloin ei tarvitse mitata erillisiä pulsseja. Lasersäde on usein moduloitu sinimuotoiseksi aalloksi. (Rönnholm 2005.)

Tässä menetelmässä lähetetään jatkuvaa lasersädettä, jonka amplitudia (*AM, amplitude modulated*) tai taajuutta (*FM, frequency modulated*) muutetaan ja lähtevää sädettä verrataan palaavaan säteeseen (kuva 4). Lentoaika saadaan laskettua kaavalla

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times \frac{\lambda_m}{c} \quad (4)$$

, jossa $\Delta\varphi$ on vaihe-ero ja λ_m on amplitudin muutoksen aallonpituus. Epävarmuus matkassa eli *range uncertainty* saadaan laskettua kaavalla

$$\delta_{r-AM} \approx \frac{1}{4\pi} \frac{\lambda_m}{\sqrt{SNR}} \quad (5)$$



Kuva 4. Vaihe-eromittauksen periaate (Kukko 2005).

Suurin aallonpituus kertoo maksimimittausetäisyyden, joka on kyseisen aallonpituuden puolikas, koska tämän jälkeen etäisyys muuttuu monitulkintaiseksi. Säteen kuljettua tietyn matkan laite ei osaa yksiselitteisesti sanoa, onko mitattu etäisyys kauempina vai lähempänä tietystä raja-arvosta. Tämä vapaasti käännettynä monitulkintaisuusväli (*ambiguity interval*) saadaan laskettua kaavalla

$$\rho_{max-AM} = \frac{c}{2} \times \frac{1}{f_m} = \frac{\lambda_m}{2} \quad (6)$$

, jossa f on taajuus. Laitteiden käyttöohjeissa on usein ilmoitettu tämä ”ambiguity interval”, mutta nyrkkisääntönä kuitenkin on, että ne mittaavat noin 2/3 tästä etäisyydestä. Hyvälaatuista pistepilveä saadaan vielä pienemmältä matkalta. Monitulkintaisuuden vähentämiseksi voidaan käyttää kahta eri taajuutta. (Vosselman & Maas 2010: 5–7; Joala 2011.)

Taajuuden muuntelu (FM) on toinen tapa. Siinä käytetään kolmiomaista tai sahaamasaaltoa. Jaksonaika voi olla joitakin millisekunteja. Epävarmuus matkassa saadaan kaavalla

$$\delta_{r-FM} \approx \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{c}{\Delta f} \frac{1}{\sqrt{SNR}} \quad (7)$$

, jossa Δf on taajuuden muutos. Monitulkintaisuusväli on

$$\rho_{max-FM} = \frac{c}{4} T_m \quad (8)$$

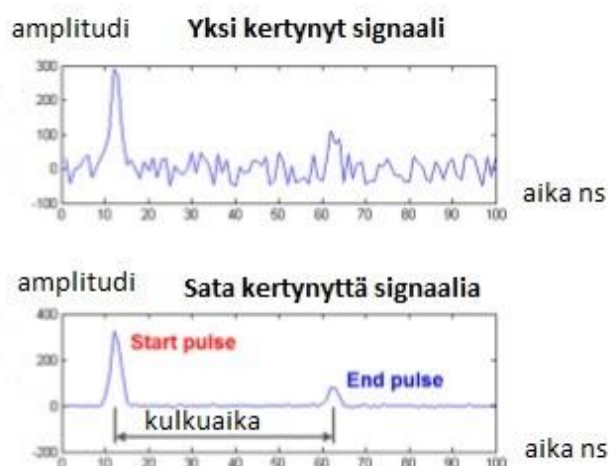
, jossa T_m on jaksonaika $\frac{1}{f_m}$. (Vosselman & Maas 2010: 5-7.)

Vaihe-eromittauksella voidaan päästä mikrometriluokan tarkkuuteen. AM-mittaustavalla voidaan päästä hyvin korkeisiin pistemääriin lyhyessä ajassa (jopa miljoona pistettä/sekunti), mutta maksimimittausetäisyys on yleensä alle 100 m. Tarkkuus on optimaalisimmissa järjestelmissä 0,1 mm. FM-menetelmällä voidaan päästä jopa teoriassa 2 μm :n tarkkuuteen lyhyillä matkoilla. Käytännössä tarkkuudet ovat 30–250 μm :n välillä, mutta pisteitä mitataan tällöin sekunnissa vain 40–250. (Vosselman & Maas 2010: 8.)

2.3.3 Aaltomuodon digitointi

Aaltomuodon digitointi eli *waveform digitizing (WFD)*, joka tunnetaan myös nimellä täyden aaltomuodon tekniikka (*Full Waveform*), yhdistelee kulku-aikaan ja vaihe-eroon perustuvia mittaustekniikoita. Lähetetyn aloituspulssin ja vastaanotetun stop-pulssin (kuva 1) aaltomuoto digitoidaan. Etäisyys kohteeseen lasketaan digitoiduista pulsseista samalla tavalla kuin signaalin kulkuajan mittaamisen menetelmässä.

Laite kerää ja arvioi jatkuvasti aloitus- ja stop-pulsseja. Mitä enemmän pulsseja lähetetään, sitä tarkemmin voidaan digitoida näitä pulsseja ja myös SNR paranee. Tämän kertymän (*accumulation*) kasvattaminen johtaa parempaan tarkkuuteen etäisyydenmittauksessa (kuva 5). (Maar & Zogg 2014.)



Kuva 5. Signaalien kertymän kasvattaminen lisää etäisyydenmittauksen tarkkuutta (Maar & Zogg 2014).

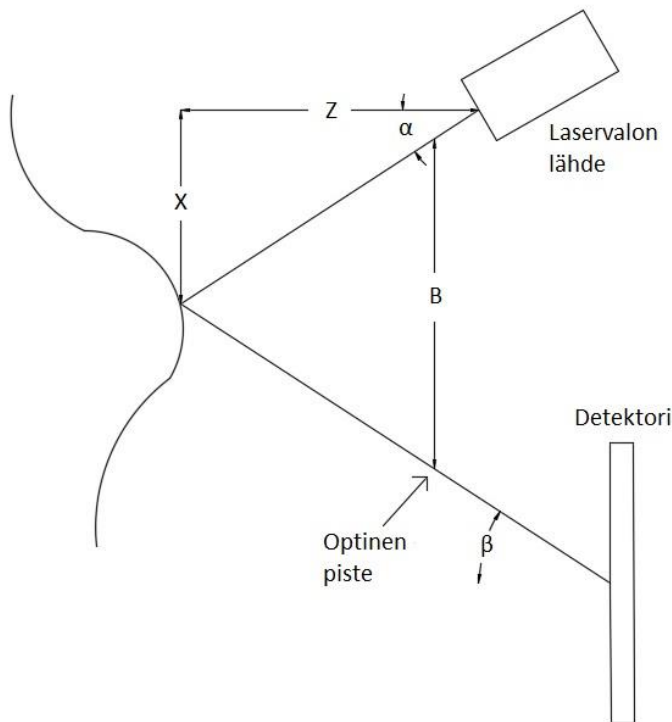
Aaltomuodon digitointi tuo lisäarvoa mittauksiin, koska alkuperäiseen mittausaineistoon voidaan palata eri tavalla kuin laitteissa jotka eivät tallenna palaavan signaalin muotoa. Digitoiduista kaiuista nähdään koordinaattien, etäisyyksien ja mittausajankohdan lisäksi signaalin amplitudi, reflektanssi, leveys ja muodon hajonta. (Nordic Geo Center Oy 2012.)

Amplitudi, pulssin leveys ja toistoväli vaikuttavat etäisyydenmittaukseen signaalien kertymisen lisäksi. Pulssin leveyden ja toistovälin suhdetta $\frac{T_{on}}{T_{rep}}$ kutsutaan käyttömääräksi (*duty cycle*). Matala toistoväli lisää herkkyyttä ja pieni pulssinleveys lisää tarkkuutta, koska sen keskipisteen määrittäminen on helpompaa. Molemmat kannattaa siis pitää pieninä, koska vähäinen käyttömäärä lisää sekä mittauksen tarkkuutta, että mittausnopeutta. (Maar & Zogg 2014.)

WFD-mittaustapa on joustava mittaustapa, koska maksimimittausetäisyyteen, mittauksen kestoon ja tarkkuuteen voi vaikuttaa sekä kertymällä että käyttömäärällä. Joustavuus on suuri etu, koska eri tilanteissa laserkeilaimelta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia. Menetelmällä päästään nopeaan mittausaikaan ja pitkiin maksimimittausetäisyyksiin, kuten *time-of-flight*-menetelmällä, mutta siinä on myös vaihe-eromittauksen hyviä puolia: pieni laserjalanjälki ja suuri tarkkuus. (Maar & Zogg 2014.)

2.3.4 Kolmiointimittaus

Kolmiointi (triangulation) eroaa muista menetelmistä. Se perustuu etäisyyksien mittamisen sijasta kulmien mittaamiseen. Kohteesta heijastuva säde kerätään tunnettuun optiseen pisteeseen, jolloin tunnetaan lähtevän ja saapuvan säteen välinen tarkka etäisyys sekä lähtö- ja tulokulmat (kuva 6). Trigonometrian keinoin voidaan laskea kolmioiden muut sivut eli etäisyydet kohteeseen. Virheet syntyvät tässä menetelmässä lähinnä lasersäteen havaitsemisessa tapahtuvasta hajonnasta. (Vosselman & Maas 2010:8-9.) Tällä menetelmällä päästään jopa mikrometriluokan tarkkuuteen, mutta mittausetäisyydet ovat pieniä ja laitteet ovat hyvin herkkiä ympäristöstä tuleville häiriöille. Niitä käytetäänkin esimerkiksi teollisuudessa pienten kohteiden tarkkaan mallintamiseen. (Heiska 2009.)



Kuva 6. Kolmiointimittauksen periaate. Kun tunnetaan kulmat α ja β sekä etäisyys B, voidaan pisteelle laskea trigonometristen funktioiden avulla X- ja Z-koordinaatit. (Vosselman & Maas 2010: 8–9.)

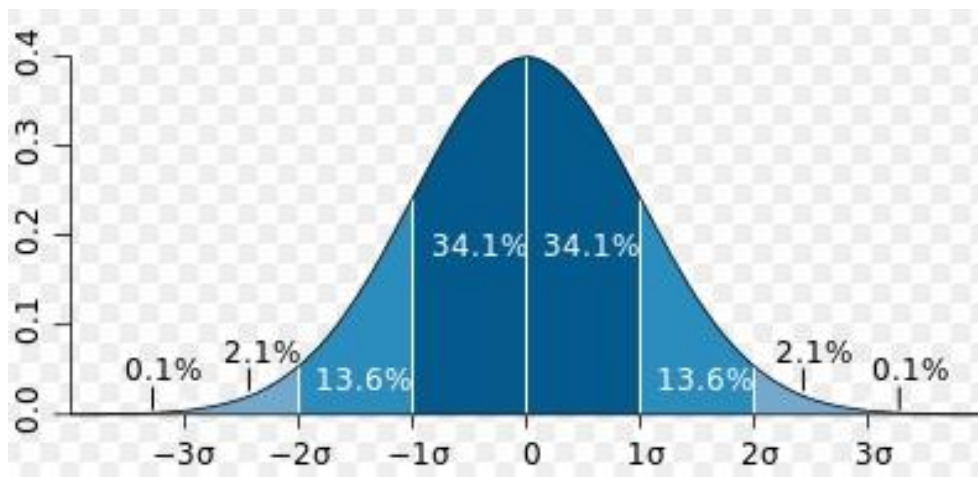
3 Laserkeilauksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä

3.1 Etäisyystarkkuus

Etäisyydenmittauksen virheet koostuvat satunnaisvirheestä eli kohinasta, systemaattisesta virheestä ja lineaarisuusvirheestä eli siitä, miten matka vaikuttaa systemaattiseen virheeseen. Mitattavan pinnan ja ympäristön ominaisuudet vaikuttavat myös, tästä lisää myöhemmin.

3.1.1 Normaalijakauma

Mittausvirheiden oletetaan yleensä muiden luonnontieteen satunnaisilmiöiden tavoin jakautuvan normaalijakauman eli Gaussin käyrän mukaisesti (kuva 7). Tärkeä mittausvirheitä kuvaava luku on sigma eli σ . Se on luku, jota vähemmän poikkeamaa hyväksytystä vertailuarvosta eli standardoidun normaalijakauman nollakohdasta on 68,2 %:ssa mitauksista. Myös lukua 2σ saatetaan käyttää. Se kertoo etäisyyden, jonka sisälle nollakohdasta menee noin 95 % havainnoista. (Hajontaluku 2017).



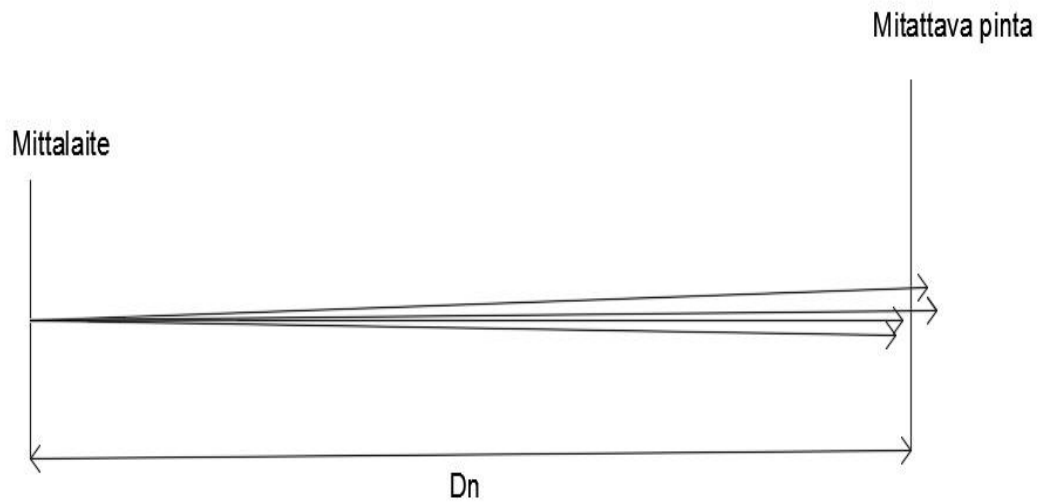
Kuva 7. Normaalijakaumaa kuvaava Gaussin käyrä (Hajontaluku 2017).

3.1.2 Keskihajonta ja rms-luku

Laserkeilauksen etäisyysmittaustarkkuutta testataan vertaamalla etäisyydenmittausten keskiarvoa D tunnettuun nimellismatkaan tai muuhun luotettavana referenssinä pidettävään hyväksytyyn arvoon (*accepted value*) D_n (kuva 8). Hyväksytty arvo voi olla esimerkiksi tarkemmalla mittausmenetelmällä mitattu arvo tai pitkän linjan keskiarvo. Keskiarvo lasketaan kaavalla

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \quad (9)$$

, jossa D_i on etäisyydenmittaukset, i on indeksi ja N mittausten lukumäärä. Oletuksena on, että mittaustulosten lukumäärän kasvaessa D lähestyy nimellismatkaa D_n . Jos näin ei tapahdu, mittauksissa on systemaattinen virhe, joka on $D - D_n$.



Kuva 8. Keskihajonta (Joala, 2011).

Nimellisarvosta poikkeamien neliöiden keskiarvosta saadaan mittaustuloksien keskihajonta (kuva 8), olettaen, että mittausrvirheet jakautuvat normaalijakauman mukaisesti, joko kaavalla

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D - D_i)^2} \quad (10)$$

tai

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D - D_i)^2}. \quad (11)$$

Kohinan mittana käytetään joko keskihajontaa tai rms-lukua (*root mean square* eli neliöllinen keskiarvo). Rms-luku lasketaan kaavalla

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_n - D_i)^2} \quad (12)$$

eli mittaustulokset vähennetään keskiarvon sijaan hyväksytystä arvosta. Rms-luvussa näkyy siis systemaattinen virhe, koska tällöin keskiarvo $D \neq 0$. Jos systemaattista virhettä ei ole, rms-luku on sama kuin keskihajonta. Nämä kaksi käsitettä sekoitetaan usein

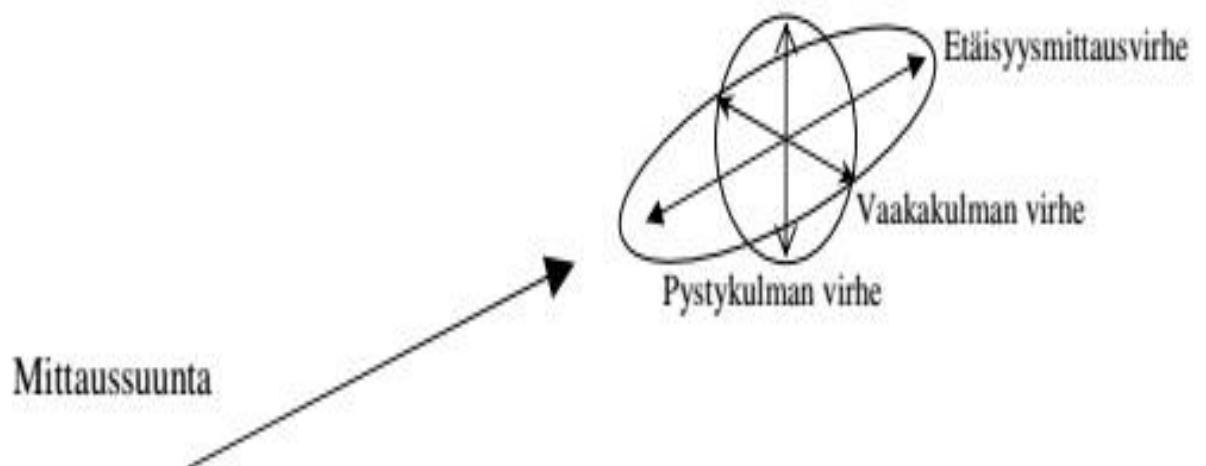
toisiinsa ja siitä, ovatko ne eri asia, on käyty keskustelua. (Joala 2011; Vilska 2017; Deakin & Kildea 1999.)

3.1.3 Virheiden lineaarisuus

Lineaarinen virhe tarkoittaa virheen suuruuden muutosta matkan mukaan. Lasersäteen amplitudi pienenee etäisyyden funktiona suhteessa etäisyyden neliöön. (Vosselman & Maas 2010: 15; Heiska 2009: 31.) Siksi pidemmillä matkoilla kohina, ympäristöstä johtuvat virheet ja systemaattiset virheet kasvavat enemmän (Joala 2011).

3.2 Kulmatarkkuus

Mitattujen pisteiden koordinaatit lasketaan etäisyyden lisäksi vaak- ja pystykulmien avulla. Virheitä syntyy siis myös kulmien mittauksesta. Jotkut laitevalmistajat saattavat kertoa kulmien mittaustarkkuuden sijasta resoluution, joka ei ole sama asia, vaan se kertoo pistetiheyden. Pistetiheys kertoo, kuinka pienet kohteet on mahdollista havaita. (Joala 2011; Koski 2001: 25.) Resoluutio voidaan laskea, jos tiedetään, kuinka monta pistettä laite kykenee mittaamaan 360° pyörähdettyään. Esimerkiksi mitattaessa 150 000 pistettä 360° :n kierroksella resoluutio on $0,0024^\circ$. (Joala 2011.)



Kuva 9. Mittausvirheen muodostuminen kulma- ja etäisyysvirheistä (Joala 2011).

Todellinen piste on jossakin kolmen virhevektorin muodostaman ellipsin sisällä (kuva 9). Mittausvirheen d muodostuminen saadaan kaavalla

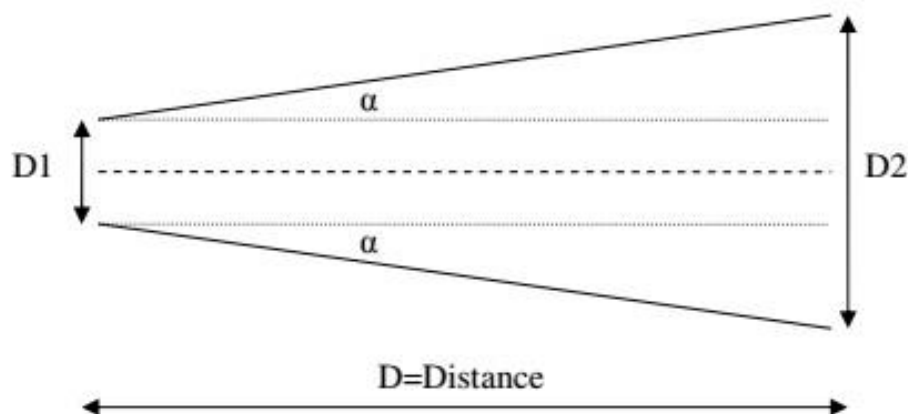
$$d = \sqrt{d_m^2 + d_v^2 + d_p^2} \quad (13)$$

, jossa d_m on etäisyyden D mittausvirhe, d_v vaakakulman mittausvirhe ja d_p pystyakulman mittausvirhe. Virhevektorien vaikutus lopullisessa koordinaatistossa riippuu suoritettujen mittausten suunnista. (Joala 2011.)

3.3 Laserpulssin ominaisuudet

Laserpulssin muodon ominaisuuksia (*time-of-flight*-menetelmässä) ovat pulssin ajallinen kesto (engl. *pulse width*) ja keilan leviäminen eli divergenssi (engl. *beam divergence*). Divergenssikulma, pulssin kulkema matka, pulssin tulokulma ja mitattavan kohteen geometria vaikuttavat siihen, kuinka suuren osan kohteesta pulssi valaisee. Tätä kutsutaan laserin jalanjäljeksi (engl. *footprint*). (Hovi 2011: 4.)

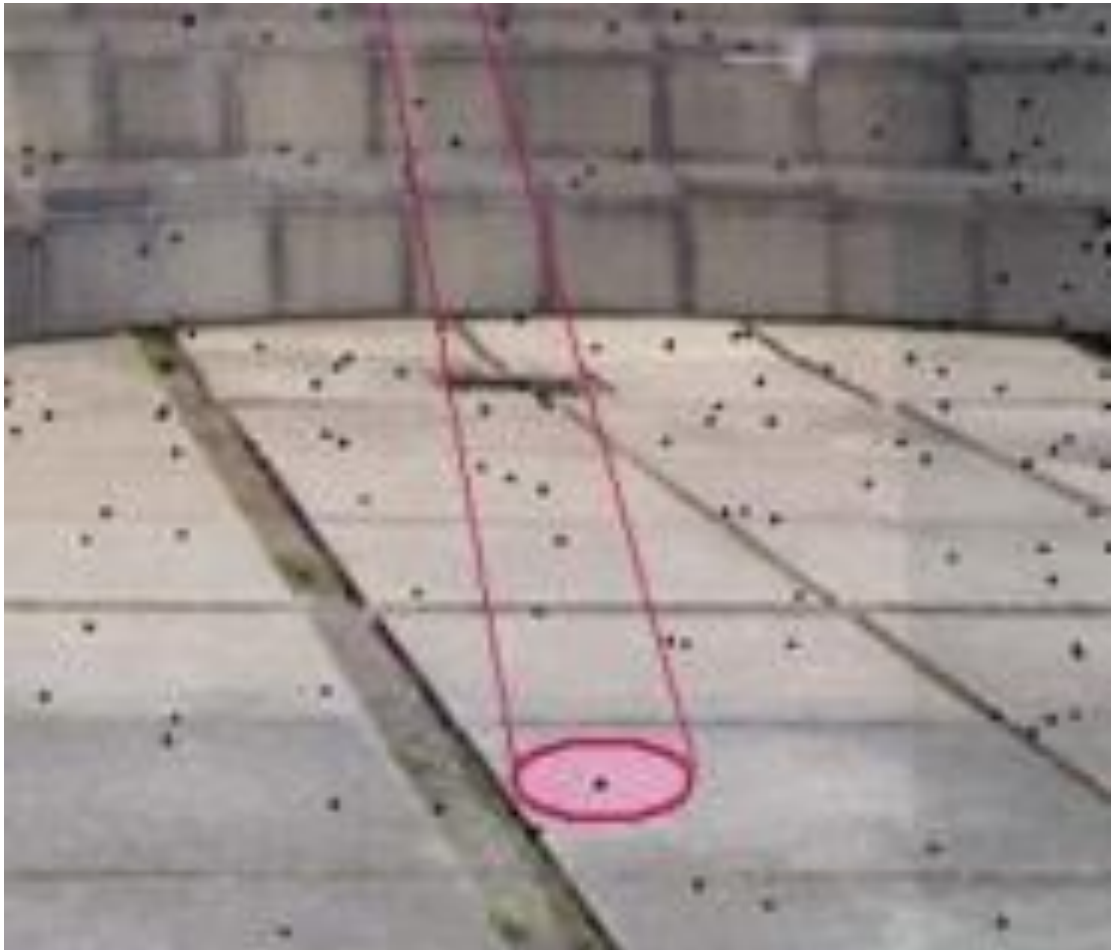
Divergenssikulma (kuva 10) tarkoittaa avaruuskulmaa, jonka sisällä lasersäteen energia e pienenee tiettyyn osaan huippuenergiasta. Mitta on tapana ilmoittaa lukemana $1/e^2$, eli säteen energia vaimenee mainitun kulman sisällä $1/e^2$:n verran huippuenergiasta. (Kukko: 2005.)



Kuva 10. $D1$ on säteen halkaisija ulostullessa, $D2$ on säteen halkaisija etäisyyden D päässä. Divergenssi lasketaan kaavalla $\beta = 2 \times \alpha$. $D2$ lasketaan kaavalla $D2 = D1 + D \times \tan(\beta)$. (Joala 2011.)

Mittayksikkönä divergenssin määrittelyssä käytetään yleensä milliradiaania. Säde, jonka divergenssi on 0,3 mrad leviää 100 m:n matkalla 30 mm. (Joala 2011.) Lasersäteen leviäminen aiheuttaa sen, että kaikuja rekisteröidään muualta kuin säteen keskikohdasta. Tämä aiheuttaa epätarkkuutta mittauksiin, koska suuremman jalanjäljen alueella on suuremmat muotovaihtelut. (Kukko 2005.) Kohteen todellinen sijainti voi olla missä tahansa laserjalanjäljen (kuva 11) alueella (Vosselman & Maas 2010: 97).

Lasersäteen leviämiskulma voi olla resoluutiota suurempi. Laitteen korkea resoluutio eli tiheä näytteenottoväli ei siis takaa korkeaa tarkkuutta. Mikäli säde on resoluutiota leveämpi, aiheutuu ongelmia erityisesti monimutkaisissa pinnoissa, joiden yksityiskohdat hämärtyvät. Resoluutioarvon ilmoittamiseen on kehitettykin uusia tapoja, jotka ottavat huomioon pienimmän pistevälin lisäksi myös säteen leviämisen. (Lichti 2004.)



Kuva 11. Laserjalanjälki (Rönholm, 2005).

3.4 Ulkoiset tekijät

3.4.1 Pinnan heijastavuus

Pinnan heijastavuutta kuvataan lähetetyn ja heijastuneen lasersäteen voimakkuuden suhteena. Pinnan heijastuskerroin eli albedo on joko luku väliltä 0–1 tai prosenttiluku. Tähän heijastavuuteen eli reflektanssiin vaikuttaa moni tekijä:

- aineen sähkömagneettiset ominaisuudet, kuten permittiivisyys, permeabiliteetti ja konduktanssi
- pinnan väri
- käytetyn laserin aallonpituus
- lasersäteen tulokulma
- polarisaatio
- pinnan kovuus
- pinnan lämpötila ja kosteus.

Heijastuneen lasersäteen intensiteetin ja pinnan heijastavuuden välinen riippuvuus saadaan yhtälöstä

$$I = \frac{\rho \cos \beta}{R^2} \quad (14)$$

, jossa I on heijastuneen säteen intensiteetti, ρ on pinnan heijastuskerroin, β on säteen tulokulma ja R on etäisyys kohteeseen. Tämä on Lambertin heijastusmallin mukainen yhtälö, jota pidetään riittävän tarkkana kuvaamaan säteen diffuusia heijastumista. (Reshetyuk 2006: 58–59.)

Vaaleasta pinnasta saadaan tarkempi mittaustulos kuin tummasta pinnasta, koska suurempi osuus säteilystä heijastuu takaisin. Myös mittausetäisyyden kasvamisen aiheuttama virheiden lineaarinen kasvu on heikompaa vaaleita pintoja mitattaessa. (Reshetyuk 2006: 59.) Huonommin heijastavasta kohteesta kimpoavan kaiun amplitudi alenee enemmän, joten laitteet saattavat tulkita niiden olevan kauempana. Esimerkiksi asfaltissa olevat valkoiset kuviot saattavat pistepilvessä ”leijua” asfalttipinnan yläpuolella,

koska laite tulkitsee niiden olevan lähempänä. (Vosselman & Maas 2010:15.) Jos mitattava pinta heijastaa liian hyvin, saattaa syntyä karkeita virheitä tai laite ei välttämättä kykene etäisyydenmittaukseen ollenkaan. Näin voi käydä esimerkiksi metallia tai heijastinteippiä mitattaessa. Joissakin tapauksissa, esimerkiksi marmoria tai puuta mitattaessa, lasersäde voi läpäistä mitattavan pinnan, josta aiheutuu noin 1 cm suuruisia virheitä etäisyydenmittaukseen. (Reshetyuk 2006: 59.)

3.4.2 Ilman olosuhteet

Ilman olosuhteiden säteen intensiteettiin aiheuttamia muutoksia selittävät Rayleigh'n ja Mien sironta sekä absorptio (Reshetyuk 2006: 60–61). Sironnalla tarkoitetaan ilmiötä, jossa atomi absorboi itseensä fotonin ja emittoi sen, jolloin valonsäde heijastuu toiseen suuntaan. Absorptio tarkoittaa, että aine imee itseensä energiaa joko emittoiden sen tai muuttaen sen lämpöenergiaksi. Molemmat ilmiöt heikentävät lasersäteen energiaa. (Ilmakehä-ABC 2016.) Kun sirottavan objektin koko on huomattavasti aallonpituutta pienempi, esimerkiksi ilman molekyyli, puhutaan Rayleigh'n sironnasta. Sironnan intensiteetti on $1/\lambda^4$, jolloin pienemmän aallonpituuden valo, kuten sininen valo, siroaa huomattavasti esimerkiksi punaista enemmän. (Hänninen 2015.) Mien sironta aiheutuu hiukkasista, jotka ovat säteeltään melko samaa suurusluokkaa valon aallonpituuden kanssa, kuten savukaasut, pöly ja aerosolit (Ojansivu 2002: 9). Muutos säteen intensiteettiin riippuu siis

- laserin aallonpituudesta
- lasersäteen kulkemasta matkasta
- ilman lämpötilasta
- ilmanpaineesta
- ilmakehän kaasuista
- sääolosuhteista
- ilmassa olevista mikropartikkeleista.

(Reshetyuk 2006: 60–61.)

3.4.3 Interferenssi

Interferenssi tarkoittaa kahden tai useamman aallon yhteisvaikutusta. Samanvaiheiset aallot vahvistavat ja erivaiheiset aallot heikentävät toisiaan. (Peltonen yms. 2012: 103–104). Muista valonlähteistä tuleva valo voi vaikuttaa laserkeilauksen etäisyystarkkuuteen, jos se on huomattavan voimakasta havaittuun laservaloon verrattuna (Reshetyuk 2006: 69).

3.4.4 Tähysvakio

Kuten takymetrimittauksessa on prismavakio, myös laserkeilauksessa on tähysten rakenteesta ja heijastinmateriaalista aiheutuvaa virhettä. Mittalaitteet myös mittaavat tähyksiä eri tavoin. Eri tähyksille voidaan määrittää käytettävän laitteen kanssa tähysvakio korjauksia varten. (Savolainen 2014: 22.)

3.5 Laitteen sisäiset tekijät

Mittalaitteiden tekniikasta johtuvat virheet voivat olla satunnaisia tai systemaattisia. Systemaattisten virheiden aiheuttajiin kannattaa kiinnittää erityistä huomiota, koska laserkeilain on automatisoitu mittauslaite, jossa käyttäjän vaikutus on pieni. Laserkeilainten tekniikan aiheuttamat virheet voidaan jakaa kahteen luokkaan:

- Luontaiset virheet, jotka johtuvat lasersäteen ja mittauskoneiston ”epätäydellisyydestä”. Näihin virheisiin ei voi vaikuttaa laitteiston suunnittelulla.
- Spesifit virheet, joihin voi vaikuttaa laitteen koneiston suunnittelulla ja laitteen kalibroinnilla.

SNR-luvulla eli *signal-to-noise ratio*:lla on huomattavan suuri vaikutus etäisyystarkkuuteen, eikä etäisyydenmittauslaitteisto edes toimi SNR-luvun ollessa liian pieni. SNR-lukua pienentävät elektroniikan lämpeneminen ja vastaanotetun säteilyn ”vuotovirta” sekä energiahäviöt. Laitteiston vastaanottoherkkyys ja säteen vastaanottavan linssin paksuus taas kasvattavat sitä. (Reshetyuk 2006: 40–43.)

Systemaattisia virheitä aiheuttavat

- viiveet säteen kulkuajan mittauslaitteistossa. Näitä sattuu helposti tilanteissa, joissa pintamateriaalin heijastavuus muuttuu nopeasti.
- nopeasti muuttuvat lämpötilat.
- kaapeleiden ja komponenttien viiveistä johtuvat erot sähköisten ja mekaanisten nollapisteiden välillä (nollavirhe, zero error)
- säteitä heijastavien peilien kulmien ja pyörimisnopeuden epätarkkuus.

(Reshetyuk 2006: 44–51.)

Laitteissa saattaa olla tasausta mittaavan kallistusmittarin lisäksi kompensattori. Kompensaattori mittaa kallistuman pitkittäis- ja poikittaissuunnissa ja korjaa sen vaikutukset mittaukseen. Kompensaattorin asettumistarkkuudessa on aina jonkin verran virhettä. (Joala 2011.)

4 Tutkimuksessa käytettävät laitteet ja ohjelmat

Tutkiessani laserkeilauksen soveltuvuutta erilaisten pintojen mittaamiseen käytin kahta eri mittalaitetta ja vertasin niillä saatuja tuloksia keskenään.

4.1 Leica P40 -laserkeilain

Leica P40 on uudenaikainen ja laadukas laserkeilain, joka perustuu *time-of-flight*-menetelmän ja *Waveform Digitizing* -teknologian käyttöön. Sillä pystyy mittaamaan maksimissaan miljoona pistettä sekunnissa ja 270 metrin etäisyyteen. Lasersäde suunnataan pyörivällä vinopeilillä, joka mahdollistaa laajan 360° x 290° -näkökentän. Mittausnopeus ja -etäisyys vaihtelee EDM-tilasta (*Electronic Distance Measurement*) riippuen. EDM-tila voi olla asetettuna nopeus- tai aluetilaan (kuva 13): nopeustilassa taajuus on kaksinkertainen aluetilaan nähden, jolloin korkea resoluutio saavutetaan nopeammin, mutta maksimimittausetäisyys on vain 140 metriä. Laitteessa on integroitu teräväpiirtokamera, jolla voidaan kuvata keilattavaa kohdetta. (P40/P30 Käyttäjän käsikirja 2016.)

Kuvien 12–14 taulukoissa on esitetty lasersäteen ominaisuuksia.

Näkyvä laser:

Kuvaus	Arvo
Aallonpituus	658 nm
Korkein säteilyteho	0,23 mW cw
Säteen hajoama (1/e)	<1,5 mrad

Kuva 12. Näkyvä laser on punaista, koska aallonpituus on punaisen valon alueella. Säteilyteho hajoaa 1/e osaan 1,5 mrad:n sisällä.

Näkymätön laser (EDM-tila: nopeus):

Kuvaus	Arvo
Aallonpituus	1550 nm
Korkein pulssienergia	135 nJ
Pulssin kesto	0,75 ns
Pulssin toistotaajuus (PRF)	1 MHz
Säteen hajoama (FWHM, täysi kulma)	<0,23 mrad
Peilin rotaatio	4 Hz
Alustan rotaatio	16 µHz

Näkymätön laser (EDM-tila: alue):

Kuvaus	Arvo
Aallonpituus	1550 nm
Korkein pulssienergia	135 nJ
Pulssin kesto	0,75 ns
Pulssin toistotaajuus (PRF)	500 kHz
Säteen hajoama (FWHM, täysi kulma)	< 0,23 mrad
Peilin rotaatio	4 Hz
Alustan rotaatio	32 µHz

Kuva 13. Näkymätön laser on infrapunasäteilyä. EDM-tilojen erona on taajuus ja alustan rotaatio.

EDM-tilan vaikutus resoluution saavuttamisen nopeuteen kuvattuna seuraavissa taulukoissa (kuva 14):

Kellauksen kesto (ScanStation P40, nopeuskäyttötila):

Resoluutio [mm @ 10 m]	Arvioitu kellauksen kesto [HH:MM:SS] täyskellauk- selle @ herkkyystaso	
	Normaali	Korkea
50	00:00:20	00:00:20
25	00:00:33	00:00:33
12,5	00:00:58	00:00:58
6,3	00:01:49	00:03:25
3,1	00:03:30	00:13:30
1,6	00:13:33	00:54:06
0,8	00:54:06	03:36:21

Kellauksen kesto (ScanStation P40, aluekäyttötapa):

Resoluutio [mm @ 10 m]	Arvioitu kellauksen kesto [HH:MM:SS] täyskellauk- selle @ herkkyystaso	
	Normaali	Korkea
50	00:00:20	00:00:28
25	00:00:33	00:00:53
12,5	00:00:58	00:01:44
6,3	00:01:49	00:06:47
3,1	00:06:47	00:26:59
1,6	00:27:04	01:48:12
0,8	01:48:12	03:36:21

Kuva 14. EDM-tilan vaikutus resoluution saavuttamisen nopeuteen.

Kuvissa 15 ja 16 on kuvattu järjestelmien suorituskykyä.

Yksittäisen mittauksen tarkkuus (78 % albedo)	Arvo
3D-sijaintitarkkuus	3 mm 50 metrissä; 6 mm 100 metrissä
Toimintasäde	1,2 mm + 10 ppm koko alueelta
Kulma (vaaka/pysty)	8" / 8" (40 µrad / 40 µrad)

Tähyksen saavuttaminen (algoritminen sovitus planaarisiin Leica B/W 4.5" tähyksiin)	
Maks. tähyalue: 75 m 2 mm vakiopoikkeama enint. 50 m	

Kaksio aksellikompensaattori	Arvo
Valittavissa	Päälle/pois
Asettumistarkkuus	1.5" / 7.275 µrad, resoluutio 1", dynaaminen alue ±5'

Kuva 15. Toimintasäde tarkoittaa etäisyystarkkuutta. Tähyksen saavuttamisetäisyys on ilmoitettu tähykselle, jolle on määritetty tähysvakio tällä laitteella mitattaessa. Alimpana on ilmoitettu kompensaattorin virhe.

Laseryksikkö:

Laserkellain	Arvo
Luokitus	Laser luokka 1 (IEC 60825-1 (2014-05) mukaan)
Aallonpituus	1550 nm (näkymätön) / 658 nm (näkyvä)

Alue:

Kellausdata	Arvo
Säteen hajonta	<0,23 mrad (FWHM, täyskulma)
Säteen halkaisija etuikkunassa	<3,5 mm (FWHM)
Minimialue	0,4 m
Maksimialue	P40: 270 m 34 % heijastavuudessa; 180 m 18 % heijastavuudessa; 120 m 8 % heijastavuudessa P30: 120 m 18 % heijastavuudessa

Kellausdata	Arvo
Aluekohina	0,4 mm rms 10 metrissä ja 0,5 mm rms 50 metrissä

Näkökenttä (kellaus):

Näkökenttä	Arvo
Tähtäys/havainto	Parallaksiton, integroitu zoom-video
Vaakasuora	360° (maksimi)
Pystysuora	290° (maksimi)
Keilausmoottorit	Suorakäyttö, harjaton
Keilausoptiikka	Pystysuunnassa kääntyvä peili vaakasuunnassa kääntyvällä alustalla: <ul style="list-style-type: none"> Enint. 50 Hz sisäisellä akulla. Enint. 100 Hz ulkoisella virtalähteellä.

Kuva 16. Laserjärjestelmän suorituskyyky.

(P40/P30 Käyttäjän käsikirja 2016)

4.2 Leica MS50 -keilaintakymetri

Leica MS50 MultiStation on laite, joka yhdistää useita mittaustekniikoita. Se sisältää laajat ja tarkat takymetriominaisuudet, GNSS-yhteyden, laserkeilaimen, kaukoputkikameran ja videokameran. Mittausnopeus on 1000 pistettä sekunnissa 300 metriin asti ja maksimiskannausetäisyys on 1000 m. Laitteella voi katsella ja käsitellä pistepilviä jo kohteessa. Myös MS50 käyttää *Waveform Digitizing* -tekniikkaa. (Leica MS50/TS50/TM50 User Manual 2017.)

Laserin ominaisuuksia on kerrottu kuvissa 17–18.

Description	Value	
	TS50/TM50	MS50
Wavelength	650 nm - 690 nm	
Maximum average radiant power	0.33 mW	
Pulse duration	800 ps	700 ps
Pulse repetition frequency (PRF)	100 MHz	1.1 MHz
Beam divergence	1.5 mrad x 3 mrad	

Kuva 17. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa laserin ominaisuudet prismaan tai heijastavaan tähykseen mitattaessa. Aallonpituus on näkyvän punaisen valon alueella.

Description	Value	
	TS50/TM50	MS50
Wavelength	650 nm - 690 nm	
Maximum average radiant power	4.75 mW \pm 5%	1.7 mW \pm 5%
Pulse duration	800 ps	1.5 ns
Pulse repetition frequency (PRF)	100 MHz	RL-Tracking, RL-Scan: 2 MHz RL-Pointer: 4 MHz
Beam divergence	0.2 mrad x 0.3 mrad	
NOHD (Nominal Ocular Hazard Distance) @ 0.25s	82 m / 269 ft	46 m / 150.9 ft

Kuva 18. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa laserin ominaisuudet prismattomassa mittauksessa. Pulssin toistotaajuus on jatkuvassa mittauksessa ja keilauksessa 2 MHz ja yksittäisten pisteiden mittauksessa 4 MHz (Leica Geosystems AG, 2013). NOHD tarkoittaa etäisyyttä, jonka sisällä laser voi olla vaarallinen (Laserworld.com).

Teknisiä tietoja on kuvissa 19–22.

Type	std. dev. Hz, V, ISO 17123-3		Display least count	
	["]	[mgon]	["]	[mgon]
TM50 R1000/ TM50 I R1000	0.5	0.15	0.1	0.01
	1	0.30	0.1	0.01
TS50 I R1000	0.5	0.15	0.1	0.01
MS50 R2000	1	0.30	0.1	0.01

Kuva 19. Laitteen kulmatarkkuus on huomattavan suuri, 1 sekunti/30 milligoonia, koska kyseessä on takymetri. Std.dev. on lyhenne termistä "Standard deviation", joka tarkoittaa keskihajontaa. Display least count kertoo, millä tarkkuudella tulokset ilmoitetaan.

Type	Kodak Gray Card	Range D		Range E		Range F	
		[m]	[ft]	[m]	[ft]	[m]	[ft]
R1000	White side, 90 % reflective	800	2630	1000	3280	>1000	>3280
R1000	Grey side, 18 % reflective	400	1320	500	1640	>500	>1640
R2000	White side, 90 % reflective	1500	4920	2000	6560	>2000	>6560
R2000	Grey side, 18 % reflective	750	2460	1000	3280	>1000	>3280

Range of measurement:

R1000: 1.5 m - 1200 m

R2000: 1.5 m - 2400 m

Distance measurements below 1.5 m are not possible.

Kuva 20. Kahdella alimmalla rivillä maksimimittausetäisyys standardisoituihin pintoihin, joiden reflektanssi tunnetaan. D-, E- ja F-etäisyydet tarkoittavat maksimietäisyyksiä eri sääolosuhteissa. D-etäisyyteen päästään vahvassa auringonvalossa ja korkeassa lämpötilassa, E-etäisyyteen pilvisellä säällä kohteen ollessa varjossa ja F-etäisyyteen yöllä, hämärässä ja maan alla.

Standard measuring	std. dev. ISO 17123-4	Measure time, typical [s]	Measure time, maximum [s]
0 m - 500 m	2 mm + 2 ppm	1.5	12
>500 m	4 mm + 2 ppm	4	12

Kuva 21. Takymetrimittauksen etäisyystarkkuus eri etäisyyksille. Näihin päästään varjoisassa kohteessa ja pilvisellä säällä. Pienin tarkkuus, jolla etäisyys ilmoitetaan, on 0,1 mm.

Distance [m]	Laser dot size, approximately [mm]
at 30	7 x 10
at 50	8 x 20
at 100	16 x 25

Kuva 22. Laserjalanjäljen koko eri etäisyyksillä.

Kuvissa 23 ja 24 on laitteen laserkeilausominaisuuksiin liittyviä tietoja.

Mode	Kodak Grey Card (Albedo 90%)	Range, up to	
		[m]	[ft]
1000 Hz	White side, 90% Albedo	300	980
250 Hz		400	1310
62 Hz		500	1640
>1 Hz		1000	3280

Kuva 23. Laserkeilauksen maksimietäisyys eri asetuksilla standardisoituun pintaan, jonka reflektanssi tunnetaan. Käytännössä näin pitkiin etäisyyksiin ei yleensä päästä.

Distance	1000 Hz	250 Hz	62 Hz	1 Hz
10 m	0.6 mm	0.5 mm	0.4 mm	0.4 mm
25 m	0.8 mm	0.6 mm	0.5 mm	0.5 mm
50 m	1.0 mm	0.8 mm	0.6 mm	0.6 mm
100 m	2.0 mm	1.0 mm	0.8 mm	0.8 mm
200 m	6.0 mm	3.0 mm	2.0 mm	1.8 mm

Kuva 24. Laserkeilauksen kohina eri etäisyyksillä ja asetuksilla mitattaessa standardisoituun pintaan (Kodak Grey Card, 90%:n albedo). Näihin teoreettisiin arvoihin päästään mitattaessa kohtisuoraan tasaiseen pintaan varjoisassa kohteessa ja pilvisellä säällä. Mitatusta pistepilvestä tehdyn pintamallin absoluuttinen sijaintitarkkuus on sama kuin takymetrimittauksen etäisyystarkkuus (kts. kuva 17).

(Leica MS50/TS50/TM50 User Manual 2017.)

4.3 Leica Cyclone

Leica Geosystems HDS Cyclone- ohjelmistomoduuli sisältää suuren määrän työkaluja pistepilvien tutkimiseen ja käsittelyyn. Se perustuu datan käsittelyyn tietokannoissa, jolloin tarve suurten pistepilviprojektien siirtämiseen tai kopiointiin vähenee. Leica Cycloneen on laadittu itsenäisiä ohjelmistomoduuleja erilaisiin tarpeisiin. Kuvassa 25 on Leica Cyclonen ominaisuuksia ja järjestelmävaatimuksia. (Leica Cyclone BASIC Data Sheet 2014.)

Leica Cyclone BASIC Specifications*		Hardware and System Requirements
Controls	Vertical & horizontal scan density control Scripting capability for automatic sequencing of scans	Minimum Specifications Processor: 2 GHz Dual Core processor or better RAM: 2 GB (4 GB for Windows Vista or Windows 7) Hard disk: 40 GB Display: SVGA or OpenGL accelerated graphics card (with latest drivers) Supported operating systems: Windows 7 (32 or 64 bit), Windows 8 & 8.1 (64 bit only), Windows 10 (64 bit only) File system: NTFS
Workflow	Automatic target acquisition, Traverse & Resection	
Control data	Auto compare control data to scan data In-field data geo-referencing	
Camera	Acquire and display digital image (scanner with internal or external camera)	
Viewing	Full 3D fly, pan, zoom, rotate; panoramic, full-dome viewing options Control color mapping using intensity, true-colour, gray scale, colour by elevation, etc.	
Hardware	Calibration check, Dual Axis Compensator management Control of: Leica HDS2500 and HDS3000, HDS4500, HDS6000, HDS6100, HDS6200, HDS7000, ScanStation 2, ScanStation C10, and ScanStation P15/P16/P20/P30/P40	Recommended Specifications Processor: 3.0 GHz Quad Core w/ Hyper-threading or higher RAM: 32 GB's or more 64 bit OS Hard disk: 500 GB SSD Drive Large project disk option: RAID 5, 6, or 10 w/ SATA or SAS drives Display: Nvidia GeForce 680 or ATI 7850 or better, with 2 GB's memory or more Operating system: Microsoft Windows 7 - 64bit File system: NTFS
Import	Point data formats: XYZ, PTS, PTX, LAS, E57, ZFS, DP Project data from Leica HDS and Pegasus scanners Image and model data: COE, BMP, TIFF, JPEG, PNG Control data from ASCII & X-Function DBX	
Export	Point data formats: XYZ, PTS, PTX, E57, DXF, PCI/CWF, DBX, Land XML Image and model data: COE, BMP, TIFF, JPEG, PNG Store in JetStream ProjectVault**	

Kuva 25. Leica Cyclonen ominaisuuksia ja järjestelmävaatimuksia (Leica Cyclone BASIC Data Sheet 2014).

4.4 CloudCompare

CloudCompare on vapaan lähdekoodin ohjelma, jossa voi verrata pistepilveä toiseen pilveen tai kolmioituun mesh-malliin. Se sisältää algoritmeja pilvien rekisteröintiin, yhdistämiseen ja tilastomatematiikkaan laskelmiin. CloudCompare tukee kymmeniä eri formaatteja. (CloudCompare home.) Tämä ohjelma soveltui tarkoituksiini, koska se sisältää ICP (Iterative Closest Point) -algoritmin, jolla voi iteroida kaksi pistepilveä päällekkäin sekä Cloud-to-Cloud Distance -toiminnon, jolla se laskee verrokipilven pisteiden etäisyydet lähimpään referenssipilven pisteeseen antaen keskimääräisen etäisyyden referenssipilvestä sekä keskihajonnan. Tätä laskentatapaa käytettäessä on syytä käyttää mahdollisimman tiheää referenssipilveä. (Cloud-to-cloud Distance 2015; ICP 2015.)

5 Tutkimukset

5.1 Pistepilven vaatimukset

Laserkeilaus on melko uusi teknologia verrattuna muihin maanmittausalan menetelmiin (kuten vaaitus ja takymetrimittaukset), eikä sille siksi ole laadittu vielä niin paljon laatuvaatimuksia. Joitain standardeja on kuitenkin laadittu: Senaatti-kiinteistöjen alun perin 2007 laatima ja usean toimijan voimin vuosina 2011–2012 COBIM -projektissa täydentämä Yleiset tietomallivaatimukset (YTV2012) asettaa osassa 2 lähtötilanteen mallintamiselle seuraavat vaatimukset

- kohina ± 10 mm
- resoluutio alle 5 mm.

Ohjeeksi annetaan, että mitta-aineiston pohjalta voidaan tehdä luotettava inventointimalli 10 mm toleranssilla, ja että aineiston pohjalta voidaan laatia yksityiskohtaisia piirustuksia, joista näkee materiaalirajat. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012.)

5.2 Mittauskokeet

Suoritin mittauskokeita tutkiakseni pintamateriaalin ominaisuuksien ja sääolosuhteiden vaikutusta keilausaineiston laatuun. Kokeet tehtiin Leica P40- ja MS50 -laitteilla Helsingissä 4.3.2017 kello 10:30–14:30. Sää oli pilvinen ja auringonpaiste kaakon ja etelän suunnasta heikkoa. Lumisadetta oli aluksi heikosti ja kello 12:00 eteenpäin hieman enemmän. Lämpötila oli noin 0 °C. Valitsin kohteet siten, että niissä oli paljon erilaisia pintamateriaaleja, ja samasta materiaalista koostuviin pintoihin tuli mittauksia eri kulmissa. Kohteet olivat pääosin rakennusten julkisivuja, koska ne ovat kohteita, joita tyyppillisesti laserkeilataan mallintamista varten.

Käytin kohteissa vain yhtä kojeasemaa, josta suoritin mittauksen ensin P40-laitteella ja sen jälkeen MS50-laitteella. En käyttänyt tähyksiä, eli kohteet mitattiin laitteiden omaan koordinaatistoon.

5.2.1 Teollisuusrakennukset

Ensimmäinen kohde oli teollisuusalueella. Kojeasema oli peltisen teollisuushallin ja kivitalon välissä. Teippasin myös pintoihin valkoisia papereita saadakseni lisää vertailtavia kohteita ja kontrastia erilaisten pintojen välille. Tästä kojeasemasta mitattiin

- puhdasta ja likaista lunta (kuvat 26–28)
- jäistä, märkää ja kuivahkoa asfalttia (kuvat 26–28)
- mustaksi ja keltaiseksi maalattua peltiä (kuva 28)
- harmaata peltiä (kuvat 26 ja 27)
- mustaa muovia (kuvat 26 ja 27)
- valkoinen, muovipintainen mainostaulu (kuva 27)
- valkoista paperia (kuvat 26–28)
- keltaista rappausseinää (kuva 28)
- harmaata betonia, joka oli enimmäkseen kuivaa mutta jossa oli muutamia märkiä kohtia (kuva 28)
- läpinäkyviä muovisia ikkunoita (kuva 26)
- tähystarra.



Kuva 26. Harmaata peltiä, mustaa muovia, valkoista paperia ja kiiltävää metallia. (Kuva Mitja Rinne)



Kuva 27. Valkoinen mainostaulu, lumista ja märkää asfalttia, harmaata peltiseinää laajassa tulo-
kulmassa ja keltaista rappausseinää (Kuva Mitja Rinne)



Kuva 28. Keltaista rappausseinää, mustaa ja keltaista peltiä ja harmaata betonia (Kuva Mitja
Rinne)

5.2.2 Toimistotalot ja muuri

Toisesta kojeasemasta mitattiin

- lunta (kuvat 29 ja 30)
- kiiltäviä mustia laattoja (kuvat 29 ja 30)
- musta ja valkoinen julkisivu toimistorakennuksesta (kuva 29)
- ikkunoita (kuva 29)
- harmaaksi maalattua metallia (kuva 29)
- valkoiseksi maalattua betonia (kuva 29)
- märkää asfalttia (kuva 29)
- hopeanvärinen, musta, vihreä ja tummansininen auto
- liikennemerkkejä molemmiin puolin. Kääntöpuoli oli harmaa ja valkoinen (kuva 29)
- punaista tiiltä
- metallinen katulamppu (kuva 30)
- valkoiseksi maalattu metalliovi.



Kuva 29. Julkisivu, lunta ja mustia, kiiltäviä laattoja (Kuva Mitja Rinne)



Kuva 30. Mustia, kiiltäviä laattoja laajassa kulmassa ja lunta (Kuva Mitja Rinne)

5.2.3 Julkisivun termoseinät

Käytin tutkimuksissa myös aineistoa 31.1.2017 Helsingin Kalasatamassa mitatuista mustista termoseinistä, koska halusin tutkia yli 50 metrin päästä keilattua mustaa metallia, jota ei ollut aikaisemmissa aineistoissa. Otin ainoastaan yhdeltä kojeasemalta keilattua aineistoa, jotta pisteet eivät olisi eri etäisyyksiltä mitattuja.

5.3 Analyysi

5.3.1 Näytteiden otto pistepilvistä

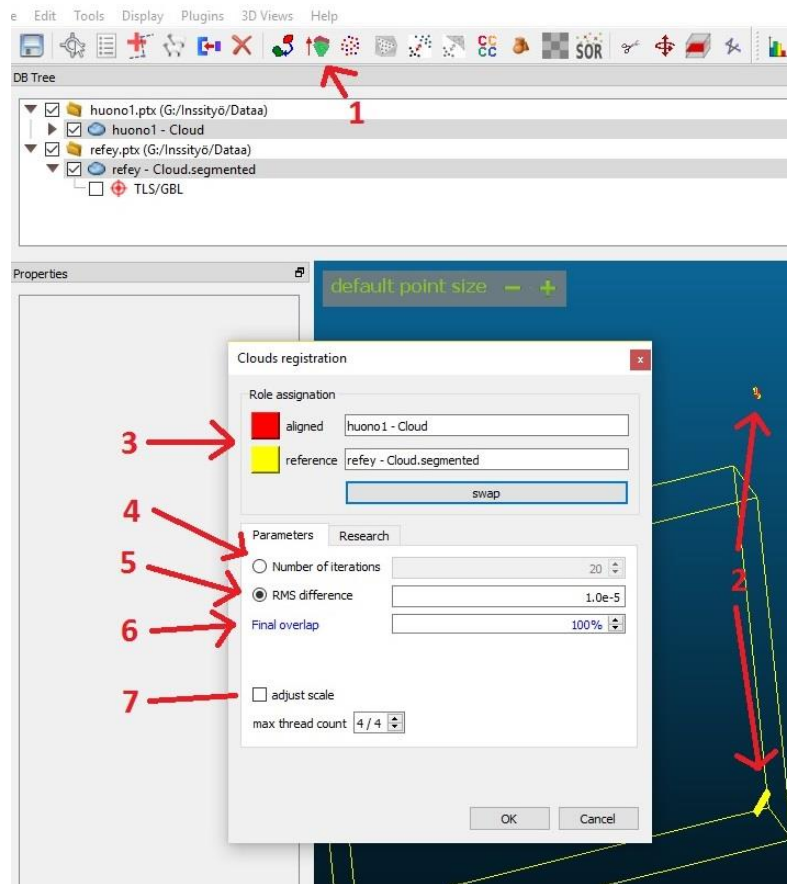
Otin Leica Cycloneen tuoduista pistepilvistä näytteitä, joita vertailin CloudComparessa referenssiin. Otin näytteitä kohdista, joissa silmämääräisesti tarkasteltuna oli suuri hajonta pistepilvessä sekä pidempien matkojen päässä olevista kohteista, joita halusin

käyttää mittausetäisyyden vaikutuksen tutkimiseen. Lisäksi otin näytteitä lähietäisyydeltä mitatusta harmaasta betoniseinästä, jotta voisin vertailla laitteiden mittaamaa hyvälaatuista pistepilveä ja käyttää tätä referenssinä, johon vertaan heikkolaatuisempaa aineistoa. Koska käytin referenssinä suoraa pintaa, en voinut verrata siihen muuta kuin toisia suoria pintoja. Rajasin valitsemani kohdan, käytin Delete Outside Fence -toimintoa, katsoin etäisyyden laitteeseen ja tallensin sen Export-toiminnolla ptx-tiedostona.

5.3.2 Näytteiden vertaaminen referenssipintaan

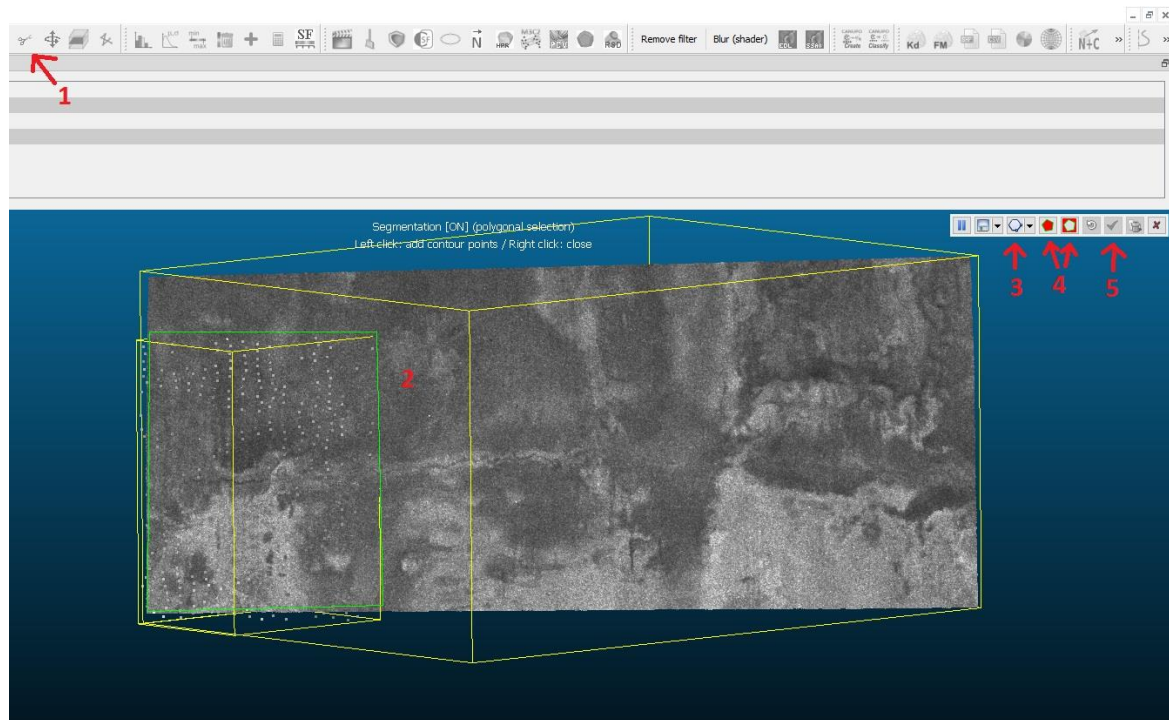
CloudComparessa vertasin näytteitä seuraavalla tavalla (kuvat 31–33):

1. Avasin CloudComparessa referenssipistepilven ja siihen verrattavan näytteen.
2. Valitsin pilvet ja käytin Fine Registration-toimintoa. Tämä toiminto käyttää ICP (Iterative Closest Point) -algoritmia, joka asettelee pilvet toistensa päälle (kuva 31). Sitä käytettäessä valitaan paikallaan pysyvä referenssi (*Reference*) ja liikuttava vertailupistepilvi (*Aligned*). Toiminto liikuttelee vertailupistepilveä, kunnes joko rms-luvulle asetettu kynnyksarvo alittuu tai iteraatioita on suoritettu haluttu määrä.



Kuva 31. 1. Fine Registration-työkalu 2. Pistepilvet avaruudessa 3. Referenssipistepilven ja vertailupistepilven valinta 4. Iteraatioiden määrän säätö ja valinta 5. Pilvien rms-luvun eron säätö ja valinta 6. Final overlap-toimintoa voi käyttää, jos vain osa pistepilvistä on samasta kohteesta 7. Adjust scale-toimintoa voi käyttää, jos pistepilvet ovat eri mittakaavassa, hyödyllinen esim. fotogrammetrisissa pistepilvissä (ICP 2015). (Kuva CloudCompare 2.8.1)

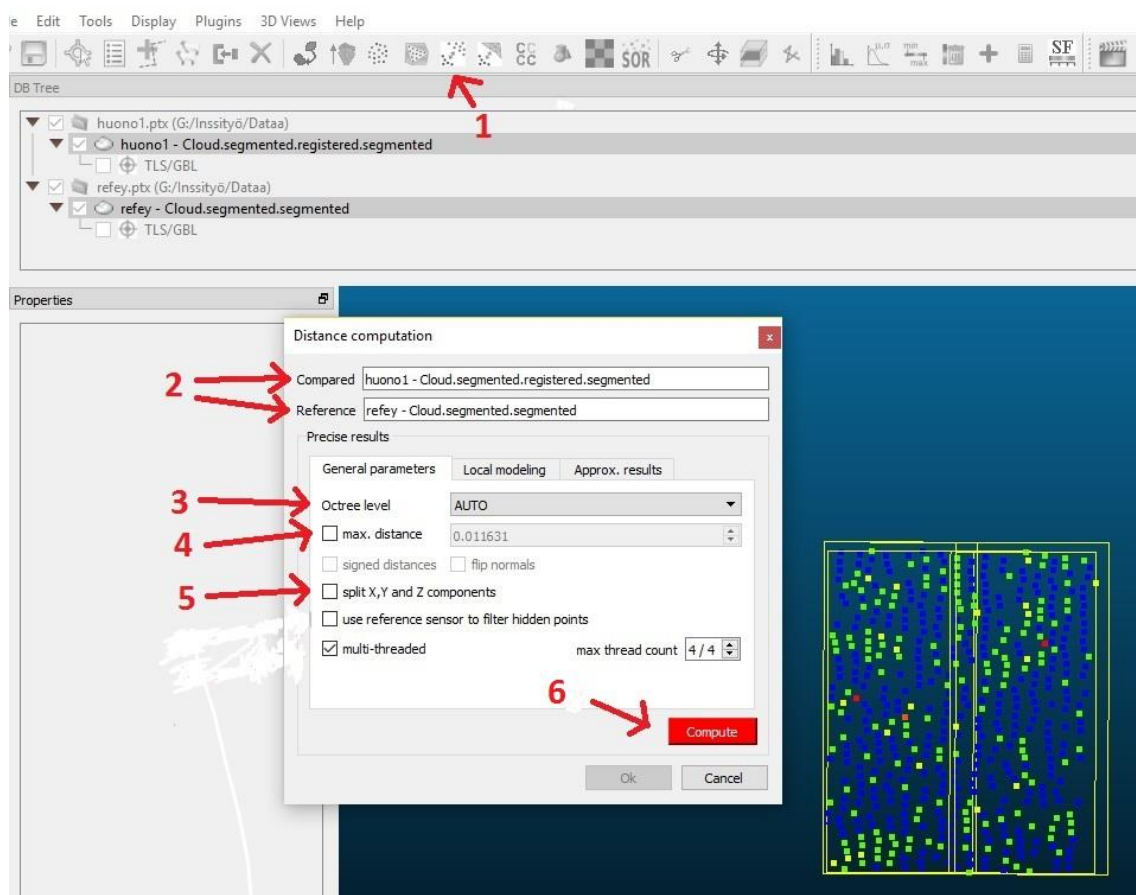
3. Kun pistepilvet on asetettu päällekkäin, voidaan joutua leikkaamaan pois osat jotka eivät ole menneet päällekkäin eli segmentoimaan pistepilviä. Tämä tapahtuu Interactive Segmentation Tool-työkalulla (kuva 32).



Kuva 32. 1. Segmentointityökalu 2. Pällekkäin olevat pilvet ja leikattavan alueen rajat. Vertailupistepilvi suuremmilla pikseleillä. 3. Rajausalueen piirto 4. Rajausalueen sisä- tai ulkopuolen leikkaaminen pois 5. Leikkauksen vahvistaminen. (Kuva CloudCompare 2.8.1)

4. Vertasin segmentoituja pistepilviä toisiinsa Cloud-to-Cloud distances-työkalulla (kuva 33). Tämä työkalu laskee vertailupistepilven jokaisen pisteen etäisyyden lähimpään referenssipilven pisteeseen. Referenssipistepilven on syytä olla mahdollisimman tiheä.

Cloud-to-Cloud distances-työkalu antaa tulokseksi keskiarvon (*Mean*) kaikkien vertailupistepilven pisteiden etäisyydestä lähimpään referenssipistepilven pisteeseen ja keskihajonnan (*Standard deviation, std. dev.*), joka on vertailupistepilven pisteiden keskimääräinen etäisyys tästä keskiarvosta. Keskihajonta on arvoltaan yksi sigma.



Kuva 33. 1. Cloud-to-Cloud Distance-työkalu 2. Valitaan referenssi ja pistepilvi, jonka pisteiden etäisyyksiä verrataan siihen 3. Octree level-kohdasta voi määrittellä, kuinka moneen osaan kohde jaetaan etäisyyksiä laskiessa. Se on oletusarvoisesti ohjelman automaattisesti säätämä 4. Kynnysarvo maksimietäisyydelle referenssipilveen. Tätä suuremman matkan päässä olevia pisteitä ei oteta mukaan laskelmiin 5. Kaikille vertailupistepilven pisteille lasketaan myös erikseen x-, y- ja z-koordinaattien erot lähimpään referenssipisteeseen 6. Painike, josta laskenta käynnistyy. (Kuva CloudCompare 2.8.1.)

(Cloud-to-cloud Distance 2015)

5.3.3 Tulosten analysointi

Keskihajonnan ja keskimääräisen etäisyyden lisäksi hyödynsin muitakin CloudComparen antamia tietoja analysoidessani pistepilviä. Nämä tiedot tulevat näkyviin diagrammeina, ja ne saa myös ladattua Microsoft Exceliin esimerkiksi tilastomatemaattisia laskelmia varten. Hyödynsin seuraavia tietoja:

- Vertailupistepilven pisteiden etäisyydet lähimpään referenssipistepilven pisteeseen. Kuvaajasta näkyy, miten etäisyydet jakautuvat ja mikä on suurimman ja pienimmän etäisyyden ero.
- Vertailupistepilven X-, Y- ja Z-koordinaattien erot lähimpään referenssipistepilven pisteeseen. Koordinaattierojen kuvaajista huomaa, jakautuvatko havainnot normaalijakauman mukaan, koska koordinaattierot jakautuvat nollan molemmin puolin joko positiivisina tai negatiivisina lukuina, toisin kuin absoluuttiset etäisyydet, jotka ovat aina positiivisia. Jos havainnot eivät muodosta Gaussin käyrää, on mittaauksissa syntynyt virheitä.
- Säteen intensiteetti. Oletin, että säteen intensiteetti vaikuttaa mittausten tarkkuuteen, joten tutkin sen korrelointia keskihajonnan ja karkeiden virheiden muodostumisen kanssa.

(Scalar fields/show histogram 2015)

Hyvin olennainen pistepilven laatua kuvaava luku oli keskihajonta, koska Yleisten Tietomallivaatimusten mukaan se ei saa olla yli 10 mm. Laskin myös kohinan suhteessa mittausetäisyyteen jakamalla keskihajonnan etäisyydellä näytteenottokohtaan, koska siitä voi päätellä, kuinka paljon mittausetäisyys ja pintamateriaali selittävät kohinaa.

Käytetty referenssi ei ole täydellinen. Laite voi olla väärin kalibroitu, jolloin syntyy systemaattisia virheitä ja mittauksessa on aina jonkin verran erilaisia virheitä (ks. luku 4.1). Tutkin referenssin luotettavuutta vertaamalla sitä samasta kohdasta otettuun, MS50-laitteella mitattuun näytteeseen.

6 Johtopäätökset

Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon pintamateriaali vaikuttaa tässä työssä käytettyjen laserkeilainten tarkkuuteen. Hypoteesina oli, että joistakin ongelmalliseksi tiedetyistä kohteista, kuten kiiltävistä ja märistä pinnoista, on vaikea saada mitattua laatuvaatimukset täyttävää pistepilveä. Oletuksena oli myös, että mittausetäisyys, lasersäteen tulokulma ja laitteella palaavan lasersäteen intensiteetti vaikuttavat pistepilven kohinaan.

Tutkimuksissani totesin, että pintamateriaalin heijastavuus, säteen tulokulma, säteen intensiteetti ja etäisyys mitattavaan kohteeseen vaikuttavat keskihajonnan suuruuteen. Äkillisesti muuttuva pintamateriaali aiheuttaa mittauksiin virheitä, koska Waveform Digitizing -teknologian hyödyntämää kertymää ei ehdi kasaantua. Jotkut pintamateriaalit aiheuttavat mittauksiin karkeita virheitä.

Iterative Closest Point -toiminto CloudComparessa on ongelmallinen, jos mittauksessa syntyy karkeita virheitä, koska se asettelee referenssipinnan siten, että molemmilla puolilla sitä vertailupistepilven pisteiden etäisyyksien referenssipistepilveen summa on suunnilleen yhtä suuri. Siten referenssipinta ei asetu siihen, missä todellinen pinta on. Karkeita virheitä voi tutkia luotettavammin mittaamalla pinnat, joissa sellaisia syntyy, tunnettuun koordinaatistoon. Ongelmalliseksi tiedetyn pinnan voi mitata kahteen kertaan, toisella kerralla esimerkiksi teipattuna tai muuten paremmin mittauskelpoiseksi tehtynä.

Leica P40- ja MS50 -keilainten pistepilven laadussa on eroja. Näitäkin voi tutkia tunnettuun koordinaatistoon mittaamalla. Näissä kohteissa en käyttänyt tähyksiä, joilla pistepilvet voi sitoa tunnettuun koordinaatistoon, koska teollisuusalueella ei ollut kunnollista kiin-topisteverkkoa, joilla olisin saanut takymetrin orientoitua. Vaikka pistepilvet eivät olleet tunnetussa koordinaatistossa, sain paljon hyödyllistä informaatiota suorittamissani tutkimuksissa.

YTV 2012:n asettama raja kohinalle ± 10 mm on melko helppo saavuttaa näillä laitteilla ja monissa kohteissa kohina oli huomattavasti alle 10 mm.

Tässä työssä on kerrottu, mitkä asiat vaikuttavat ilmassa kulkevaan lasersäteeseen, mitkä asiat synnyttävät virheitä mittauksiin ja millä tilastomatematisilla menetelmillä virheitä analysoidaan. Olen kertonut, millä tavalla tutkin käytettyjen keilainten soveltuvuutta erilaisten pintojen mittaamiseen ja mihin asioihin kiinnitin huomiota tutkimuksia tehdessäni. Luvut, taulukot, diagrammit ja havainnollistavat kuvat, joista tutkimuksen tulokset käyvät ilmi, ovat salattua tietoa ja on jätetty pois työn julkisesta versiosta.

Lähteet

CloudCompare home. Verkkodokumentti. CloudCompare.org. <<http://www.cloudcompare.org/>> Luettu 5.4.2017.

Cloud-to-cloud Distance. 2015. Verkkodokumentti. CloudCompare -wiki. http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Cloud-to-Cloud_Distance Luettu 6.4.2017.

Deakin, R.E; Kildea, D.G. 1999. A note on standard deviation and RMS. The Australian Surveyor Vol.44 No.1. < http://www.mygeodesy.id.au/documents/St_dev.pdf > Luettu 9.4.2017.

Gilchrist, Glenn. 2011. A simple method to determine surface albedo using digital photography. Verkkodokumentti. Newport High School, NP20 7YB UK. <http://vixra.org/pdf/1110.0035v1.pdf> Luettu 1.3.2017.

Hajontaluku. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. < <https://fi.wikipedia.org/wiki/Hajontaluku> > Luettu 9.4.2017.

Heiska, Nina. 2009. Universaaliskanneria etsimässä eli miten valita maalaserkeilain? Maankäyttö 1/2009. s. 30–35.

Heiska, Nina. 2010. Maalaserkeilaimet ovat kehittyneet geodeettisiksi mittauslaitteiksi. Maankäyttö 4/2010. s. 14–17.

Hovi, Aarne. 2011. Alikasvoksen mittaus ja kartoitus laserkeilauksella. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto. Metsätieteiden laitos. < https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/27570/Hovi_20110627.pdf?sequence=1 > Luettu 21.2.2017

Hänninen, Jari J. 2015. Sähkö ja magnetismi. Verkkodokumentti. Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/211040/mod_resource/content/9/ELEC-A4130_2016_L10.pdf Luettu 17.2.2017.

ICP. 2015. Verkkodokumentti. CloudCompare -wiki. <http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=ICP> Luettu 6.4.2017.

Ilmakehä-ABC. 2016. Infosivusto. Ilmatieteen laitos. <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc> Luettu 22.2.2017.

Joala, Vahur. 2011. Kallistusmittari ei ole kompensattori. Verkkodokumentti. <https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowIZDRhMTU5NzMt-ZjM1Yi00OWQwLTg3M2EtNDFlODE2MWVkbOGNi/view> Luettu 27.2.2017.

Joala, Vahur. 2011. Laserkeilaimen etäisyysmittausvirheet. Verkkodokumentti. < <https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowINt-diYjQwZTMtMmQ0OC00NjJhLWFmNjQtZDExNzc3YzlhM2FI/view>> Luettu 16.2.2017.

Joala, Vahur. 2011. Laserkeilaimen kulman mittausvirheet. Verkkodokumentti. < <https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowINjEyYzNkNDItZmFINS00MjM0LWlxYT-ctMWZhNmViYzVjYTQ1/view>> Luettu 16.2.2017.

Joala, Vahur. 2011. Laserkeilaimen mittausetäisyys. Verkkodokumentti <<https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowIMzJhNjI1NjYtOTE0Ny00NTAz-LWE4YmEtYjZkNjNINjFjZWl3/view>> Luettu 17.2.2017.

Joala, Vahur. 2011. Lasersäteen divergenssi. Verkkodokumentti. <https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXow-IYmYzYTNjMWYtYTI3ZS00Zml0LWFiZjltMjI5NjgzZTM0OGY0/view> Luettu 23.2.2017.

Koski, Jarkko. 2001. Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen. Maan- käyttö 4/2001. s. 24-26.

Kukko, Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Fotogrammetrian erikoistyö. Aalto-yliopisto. https://foto.aalto.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf Luettu 20.2.2017.

Laserworld.com. Infosivusto. <https://www.laserworld.com/en/laserworld-toolbox/nohd-calculator.html> Luettu 28.2.2017.

Leica Cyclone BASIC Data Sheet. 2014. Leica Geosystems AG. < http://www.leica-geosystems.fi/downloads123/hds/hds/cyclone/brochures-datasheet/Leica_Cyclone_BASIC_DS_en.pdf> Luettu 20.4.2017.

Leica MS50/TS50/TM50 User Manual. 2013. Versio 1.1.1. Leica Geosystems AG. Heerbrugg, Sveitsi.

Lichti, Derek D. 2004. A resolution measure for terrestrial laser scanners. Verkkopublication. Curtin University of Technology. Perth, Australia. <http://cartesia.org/geodoc/is-prs2004/comm5/papers/552.pdf> Luettu 21.2.2017.

Maar, Hannes & Zogg, Hans-Martin. 9/2014. WFD – Wave Form Digitizer Technology: White Paper. Leica Geosystems AG. HeerBrugg, Sveitsi.

Normaalijakauma. 2015. Verkkodokumentti. Wikipedia. < https://fi.wikipedia.org/wiki/Normaali_jakauma> Luettu 9.4.2017.

Ojansivu, Henri. 2002. Ilmakehän optisten ominaisuuksien selvittämisestä kokeellisin mittauksin ja simuloinnein. Pro gradu-tutkielma. Jyväskylän yliopisto, fysiikan laitos. <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/8168/G0000186.pdf?sequence=1> Luettu 17.2.2017.

P40/P30 Käyttäjän käsikirja. 2016. Versio 4.0. Leica Geosystems AG. Heerbrugg, Sveitsi.

Peltonen, Hannu; Perkkiö, Juha; Vierinen, Kari. 2012. Insinöörin (AMK) fysiikka osa II. Lahden Teho-Opetus Oy.

Reshetyuk, Yuriy. 2006. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Lisensiaatintyö. Royal Institute of Technology. Stockholm.
<http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:10841/FULLTEXT01.pdf> Luettu 22.2.2017

Rönnholm, Petri. 2005. Geoinformation in Environmental Modeling, luento 2b: laserkeilaus. Verkkodokumentti. Aalto-yliopisto. https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/178488/mod_folder/content/0/L2b_laser_scanning_suomeksi.pdf?force-download=1 Luettu 20.2.2017.

Savolainen, Matti. 2014. Laserseurainjärjestelmän kalibrointimenetelmät ja tarkkuuden tarkastelu kenttäolosuhteissa. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Scalar fields/show histogram. 2015. Verkkodokumentti. CloudCompare -wiki.
http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Scalar_fields%5CShow_histogram Luettu 18.5.2017.

Tuotteet-osio. 2017. Verkkosivut, Leica Geosystems AG. http://www.leica-geosystems.fi/fi/Leica-ScanStation-P40-P30_106396.htm Luettu 27.2.2017.

Täysi aallonmuoto. 28.5.2012. Verkkodokumentti. Nordic Geo Center Oy.
<http://www.geocenter.fi/blogi/taysi-aallonmuoto/> Luettu 17.4.2017.

Vilksa, Jorma. 2017. Matematiikan lehtori, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Sähköpostihaastattelu 1.4.2017–4.4.2017.

Vosselman, George & Maas, Hans-Gerd. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Dunbeath, Skotlanti: Whittles Publishing.

Yleiset tietomallivaatimukset. 2012. Verkkodokumentti. Buildingsmart.fi. Tietomallintamisen yhteistyöfoorumi. <<https://buildingsmart.fi/yleiset-tietomallivaatimukset-ytv/>> Luettu 9.4.2017.

